

脳内の血液動態を指標とした 課題遂行時の心的変化の分析

教育学科助教授 黒田 恭史

概要

テスト等の正答率や所要時間は、課題の種類、難易、分量等によって異なるが、加えて学習者の緊張、焦り、興奮といった心的変化もそれらと密接に連動したものであると考えられる。

本稿では、近赤外線による光計測装置を用いて、合同図形弁別課題遂行時の脳内の血液動態の変化を測定し、被験者の課題遂行時の心的変

化と血液動態との関係について検討した。その結果、難易の高い課題を実施した場合、一般に血液量が低下するレスト時において、血液量の急激な増加とその後の課題方略獲得によると考えられる減少傾向を有した事例が確認された。心的要因が学習過程に影響を及ぼすことを裏付ける生理学的資料であると予測される。

1. 問題の所在と研究の目的

1.1. 教育研究における生理学的データの活用

学習は人間の活動において極めて高次な機能であるために、その効率性や正答率には、学習者の心的変化が大きな影響を及ぼす。緊張、焦り、興奮といった心的変化は、発汗、体温、脈拍、瞬目、瞳孔面積といった人間の生理学的側面に変化をもたらすことになり、それらの変化を測定することで学習評価を数値化する試みがこれまでも行われてきた。例えば、村井（1989）は、皮膚電気反射の技術を用いて被験者が学習中の皮膚の発汗を測定し、その変化の度合いから被験者の学習への集中度を測定している。また、浅野ら（1995）、向後ら（1996）、小孫ら（1999）は、瞳孔の面積、眼球運動、瞬目といった眼に関連する測定値から学習や集中の度合いを推定しようとしている。

上記の一連の研究の目的は、いわば「学習」

という極めて複雑な構造を有する行為を、通常の外的観察からでは判別不能な状況に対して、生理学的尺度から測定・診断するための方法を開発することにあるといえよう。

1.2. 脳科学の発展と非侵襲脳活動計測手法

生理学的研究の中で最も困難とされてきたのが学習時における脳活動の測定である。荒川ら（1999）は、数字の系列を記憶する課題における脳波と瞳孔面積の変化を測定し、記憶に成功した場合と失敗した場合の差異を検討している。また、山口ら（2001、2002）は、課題遂行時における脳波測定をもとに、学習過程の分析を試みているが、測定方法の精緻化、測定値の解釈の確定、及び個人差等の問題を指摘している。

脳活動を非侵襲的に測定する装置は、医療機器としてこの間、飛躍的に進展してきた。1990

年代に入り、脳波やPET（Positron Emission Tomography）といった装置に加えて、fMRI（functional Magnetic Resonance Imaging）やMEG（Magnetoencephalography：脳磁図）が開発され、空間分解能や時間分解能が大幅に高まった（丹治・吉澤 2001）。脳内の活性化部位の正確な同定と秒単位での計測値の取得が可能となったのである。これらの装置は、脳の電気活動を測るもの（脳波、MEG）、代謝物質を測るもの（PET）、血液動態を測るもの（fMRI）の3種に大別できる。

こうした装置の開発は、制限された条件下であるものの、何らかの課題遂行時における脳内の活性化の動態を計測する可能性をもたらすことになった。例えば、村田（2002）は、被験者が安静状態で主に視覚からの刺激による課題に対して、ボタン操作による選択回答方法を考案し、fMRIを用いて人間の視覚特性を検討している。

また、1990年代前半に開発された近赤外線による光計測装置（Near Infra-red Spectroscopy；以下、NIRSと記す）、もしくは1990年代後半に開発された光イメージング装置を用いれば、自然に近い学習環境下における脳内の血液量の変化を容易に測定することが可能である（江田 2001）。このNIRSは、fMRIやMEGよりも身体的拘束性が低く、測定時における被験者の通常姿勢における学習活動を可能にするという点に特徴を持っている。脳の各部位の詳細な測定精度（空間分解能：約2.0-3.5cm）は高くはないが、継続的な脳活動の分析（時間分解能：25msec-1000msec）は極めて高い。血液中の酸素を多く有した酸素化ヘモグロビン（oxyHb）、酸素を放出した脱酸素化ヘモグロビン（deoxy-Hb）、そして両者の総和である総ヘモグロビン（totalHb）の変化量を測定することが可能である。こうした機器の登場により、自然な環境下での学習活動時における脳内の血液動態を測定

することが可能となりつつある（黒田 2003a、2003b、2003e、KURODA 2003c、黒田他 2003d）。

1.3. 研究の目的

本研究では、課題方略獲得が行われる過程、とりわけ一般に血液量が減少すると考えられている課題間の休息（以下、レストと記す）時の血液動態の変化に着目し、それらを詳細に検討することを通して、心的変化が課題遂行に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

尚、本実験では、同一種の合同図形弁別課題2種類を連続して実施することで課題方略獲得過程を再現し、大学生を被験者に1チャンネル型NIRSを使用して血液動態のデータを取得する。

2. 方 法

2.1. 実験環境

実験は、被験者毎に単独で実施する。測定者は、課題の遂行状況の観察者（問題用紙の差し替え含む）と、時間計測者の2名とする。実験に際しての阻害要因（騒音、他の視覚情報、空調不良等）はなく、被験者は課題に専念できる環境である。

2.2. 実験概要

- 1) 実験日時：2002年11月11日
- 2) 実験場所：通信総合研究所関西先端研究センター内の実験室（兵庫県神戸市）
- 3) 被験者：6名（19歳～22歳、男性1名・女性5名、教育学部教育学科大学生、全員右利き）
- 4) 測定方法：被験者は椅子に座り、机上で課題に取り組む。顎固定台を用いて、顔の位置を固定する。被験者の右前額最突出部（目視により同定）を挟むようにしてNIRS

のプローブを装着する。被験者前方よりビデオカメラにて課題遂行時の被験者の机の上（課題と手の動きの全体）を録画する。併せて、ストップウォッチ計測によって、レストの設定を行う。問題用紙の移動は不可とする。

- 5) 測定装置：1チャンネル型近赤外線による光計測装置、ビデオカメラ、ストップウォッチ、顎固定台

2.3. 課題

課題は、シート使用タイプ（5枚）とシート不使用タイプ（5枚）の計10枚があり、それぞれの用紙には3×3の格子状に9個の模様が描かれている。各模様の大きさは一辺が3.2cmの正方形である。被験者には中心部の正方形の模様と合同な図形全てを回答させる（図1：矢印で示された図形が合同な図形、3個）。従って、1枚につき8問の合同の可否の判断が必要である。

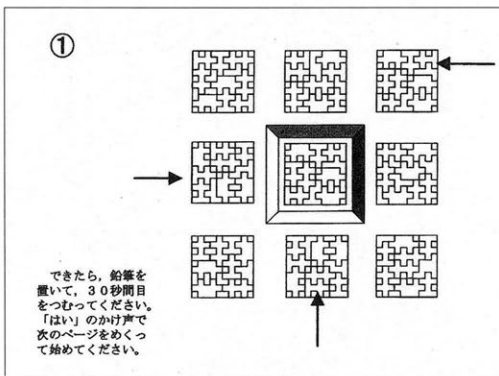


図1 回答用紙（実物はA4サイズ、横長置）

表1 各試行における合同な図形の個数

	シート使用	シート不使用
試行①、⑥	3	3
試行②、⑦	2	2
試行③、⑧	4	4
試行④、⑨	1	1
試行⑤、⑩	3	3

シート使用では、中心部の正方形の模様と合同な模様が赤色で描かれた透明なシートを被験者に与え、それを用いて回答させる。シート不使用では、目視のみによって回答させる。シート使用の5枚において中心部の正方形の図形は同一のものを採用する。シート不使用においては、シート使用と異なる模様の正方形を中心部に描く。シート不使用の5枚において中心部の正方形の図形は同一のものを採用する。また、合同となる図形の運動のタイプは8種類（例：対称、180°回転）があり、本実験ではこの8種類を満遍なく使用することで、試行間の難易に差が生じないようにした。

さらに、合同な図形の個数は、試行毎に異なるようにした（表1）。個数を一定にすると、該当個数分を選択した段階でその他の図形の考察を行わなくなるためである。被験者には、「回答用紙毎に合同な図形の個数が異なるので全ての図形を確かめるようにしてください。」との指示を口頭で行った。

2.4. 試行

以下の5つの手順で試行を実施した。

- ①プレテスト実施（簡単な図形を用い、問題回答方法及び透明シートの使用法を説明）。
- ②シート使用：30秒間閉眼・安静状態の後、「はい」の合図とともに開始。1枚目終了時点で被験者は赤色ボールペンを置く。30秒間閉眼・安静状態で休憩。「はい」の合図で2枚目開始。以下、5枚目まで同様。
- ③シート不使用：シート使用終了後、シート不使用の回答方法説明。その後閉眼・安静状態で休憩（説明時間を含み60秒）。その後、「はい」の合図とともにシート不使用を開始し、1枚目終了時点で被験者は赤色ボールペンを置く。その後、30秒間閉眼・安静状態で休憩。「はい」の合図で2枚目開始。以下、5枚目まで同様。

- ④課題終了。
- ⑤課題遂行時の感想記述。

3. 結果

3.1. これまでの脳科学研究によるデータ分析

NIRSでは、3波長の近赤外線を頭皮から照射し、各波長の近赤外線が脳内を通過することによってどの程度光量が減衰されるのかを時間経過を追って測定する。光量の減衰は、検出された光と基準との比を対数変換した値（吸光度と呼ばれる）で議論される。これらの3つの波長の吸光度から、oxyHb、deoxyHb、そして両者の総和である総ヘモグロビン（totalHb）の濃度の相対的な変化を算出する。

成人を対象にした実験において、最も多く認められる変化は、oxyHbとtotalHbが増加し、

deoxyHbが減少するというものである（Sakatani K, et al. 1998, 1999）。これは、課題遂行によって、新たな血液（oxyHb、totalHb）が増加することによって生じる現象と考えることができる。また、医学的視点で行われる実験では、レスト時にはいずれの血液量も減少し、課題再開後、再び増加するという場合が一般的である。

3.2. ベースライン補正

NIRSによって測定されるデータは、血液の相対的变化量であるために、試行段階においてそれぞれ基準値の設定（ベースライン補正）が必要となる。ベースライン補正は、試行毎にスタート地点の吸光度を0としたり、スタート地点と終了地点の吸光度データを結ぶ一次関数を求めそれを補正に用いたりするもの等、課題の特性に応じて設定される。

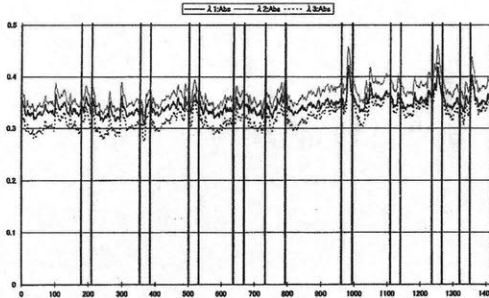


図2 吸光度データ

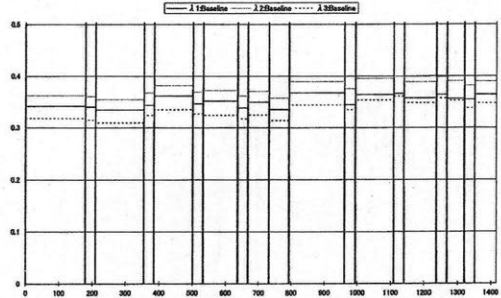


図3 ベースライン補正

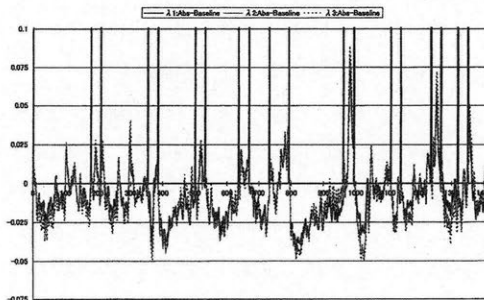


図4 補正後の吸光度データ

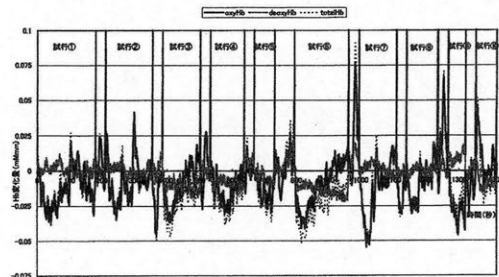


図5 血液動態の測定データ

ここでは、レスト時の変動を詳細に検討するために、各試行と各レストの全てのスタート地点を、ベースラインを0とする方法を採用した。具体的には、吸光度データ（図2）をもとに、試行①～⑩、及びその間の9回のレストのスタート時点の3波長の吸光度が0になるように設定（図3）し、その差を算出したものを得られたデータ（図4）とした。そして、図4のデータをもとに、oxyHb、deoxyHb、totalHbを求めた（図5）。

3.3. 被験者の事例

6名に対して実施した実験の結果、レスト時に血液量の増加が確認された被験者は、5名であった。一定時間の読書を繰り返すといった被験者への負荷が低いと考えられる課題においては、ほとんどの被験者で血液量の増加が確認されないことを考え合わせると、課題の難易度が高い場合、レスト時の血液量が増加する傾向にあると考えられる。

以下では、6名の被験者の内、レスト時に血液量の増加が顕著に見られた2名（Subject A、Subject B）と、増加が見られなかった1名（Subject C）のデータと事後の感想を取り上げる。6名の平均値を測定し、それらをもとに分析を試みることも可能であるが、血液動態のデータが個人内での相対的変化を示したものである点を踏まえ、個々のデータの形状と被験者の事後の感想の摺り合わせから、データに反映された事由を確定する方が詳細が明確になると考え、特徴的な3名のデータを取り上げる。

データには、oxyHb、deoxyHb、totalHbの時系列による変動がプロットされており、試行段階とレスト段階は、縦線で区切っている。試行は「試行①～試行⑩」であり、レストは「R①～R⑨」である。試行①～試行⑤、及びR①～R④まではシート使用、試行⑥～⑩、R⑥～R⑨まではシート不使用の課題である。また、R⑤は、二種類の課題間のレストであるため、通常のレストの2倍の時間（60秒）を設定している。

3.3.1. 正答率

3名の正答率は、Subject A 100%（80/80）、Subject B 100%（80/80）、Subject C 96%（77/80）であり、3名とも正確な判断のもと課題を遂行したと判断することができる。

3.3.2. 所要時間

各試行（①～⑩）に費やした所要時間は、表2のようである。試行①～試行⑤までがシート使用課題、試行⑥～試行⑩までがシート不使用課題である。

特徴としては、次の点が挙げられる。

- (1-1) Subject Aは、試行①～試行⑤（計701秒）に多くの時間を費やしている（試行⑥～試行⑩：計269秒）。また、試行を重ねるにつれ所要時間の大幅な減少が見られる。試行⑥～試行⑩の総所要時間は短く、試行⑥と⑦の間で所要時間の大幅な減少が見られる。
- (1-2) Subject Bは、試行①～試行⑤（計608秒）、試行⑥～試行⑩（計496秒）とも、段階的に所要時間が減少している。

表2 試行毎の所要時間（秒）

試行	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Sub. A	220	206	125	84	66	103	52	41	40	33
Sub. B	179	144	116	105	64	168	115	95	53	65
Sub. C	117	108	85	83	77	147	53	114	50	103

(1-3) Subject Cは、試行①～試行⑤（計470秒）においてなだらかに所要時間が減少している。一方、試行⑥～試行⑩（計467秒）にかけては所要時間の変動がW字型になっている。

3.3.3. Subject Aの場合（21歳、女性）

図6はSubject Aのデータであり、レスト時の血液量の増加が確認された事例である。

特徴としては、次の点が挙げられる。

- (2-1) R①～R②でのoxyHbとtotalHbの増加、及びdeoxyHbの減少が顕著である。
- (2-2) R④でのoxyHb、deoxyHb、totalHbは、いずれも減少している。
- (2-3) 二種類の課題間のレストであるR⑤において、大幅なoxyHbの減少が見られる。
- (2-4) R⑥において、再びoxyHbとtotalHbの急激な増加が見られる。
- (2-5) R⑦～R⑨においては、顕著な増加は

見られない。

- (2-6) 試行①～試行②ではdeoxyHbの増加とoxyHbの減少が顕著であるが、R①～R②ではoxyHbの増加とdeoxyHbの減少が見られる。

事後の感想では次の記述がみられた。

- (2-7) 試行①～試行②：最初の1、2枚は緊張して、解けなかったらどうしようと思っていた。
- (2-8) R①：目をつむっている時間がはじめて長く感じ、途中で目を開けたくなくなった。
- (2-9) 試行③：3枚目から要領が何となくつかめてきて、最初に目で見て違うものには×、合っているものを何回もピースで確認して○をつけた。
- (2-10) 試行⑥：ピースがない分、とても不安になり、中央の図をしっかりと見ようとした。
- (2-11) 試行⑦：2枚目も中央の図が同じだと

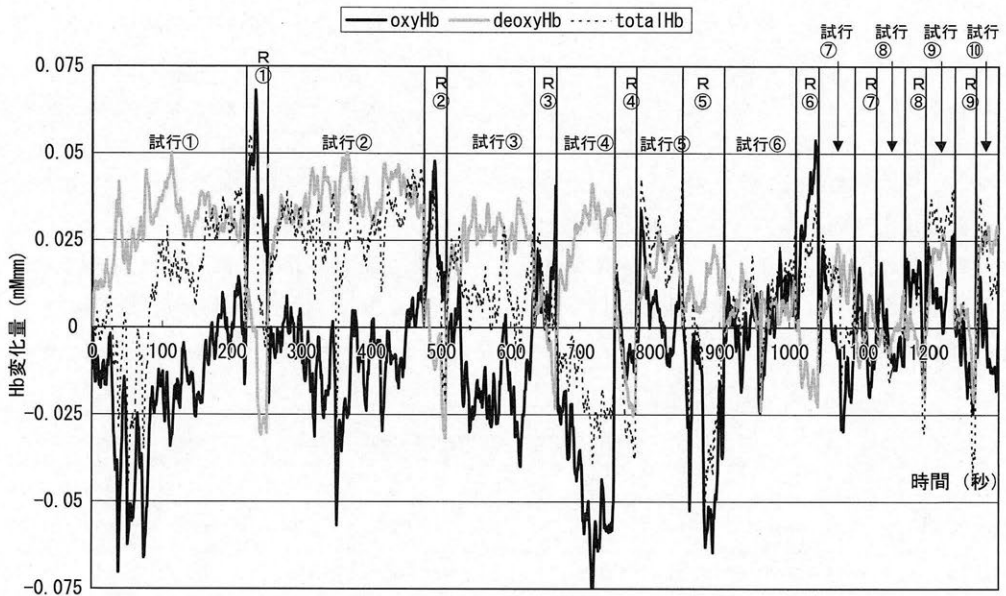


図6 Subject Aのデータ

分かると、次もこの図だと思い、特徴を探そうとした。

- (2-12) 試行⑥～試行⑩：シートあり（試行①～⑤）のときよりリラックスしていて、周りの目線や調査であることが気にならず、新聞の日曜版の折り込みのパズルをする感覚で、楽しく集中して解くことができた。

3.3.4. Subject Bの場合（22歳、男性）

図7はSubject Bのデータであり、レスト時の血液量の増加が確認された事例である。

特徴としては次の点が挙げられる。

- (3-1) R①、R③でoxyHbとtotalHbの微増が見られる。
- (3-2) R②ではoxyHbの減少が見られる。
- (3-3) 二種類の課題間のレストであるR⑤において、oxyHb、deoxyHbの増加が見られる。
- (3-4) R⑥、R⑧において、oxyHbとtotalHbの急激な増加が見られる。その間の

deoxyHbは、ほとんど増減が見られない。

- (3-5) R⑦、R⑨において、oxyHbの減少が見られる。

事後の感想では次の記述がみられた。

- (3-6) 試行①：練習問題と全く違うと思った。これはできないのではないかと考えた。
- (3-7) R①：「難しい」と思った。「他の人はできるのだろうか」と思った。リラックスできていないように感じた。
- (3-8) R②：「おそらく次もこのタイプだな」と思った。
- (3-9) R⑤：「ピースなしでできるだろうか」と思った。
- (3-10) 試行⑥：L字型が目立つものは誤りとして、すぐに×を付けた。何箇所かポイントを考え、そこが同じか考えた。
- (3-11) R⑥：何も考えていなかったと思う。
- (3-12) R⑦：ピース無しの方が、やりやすい

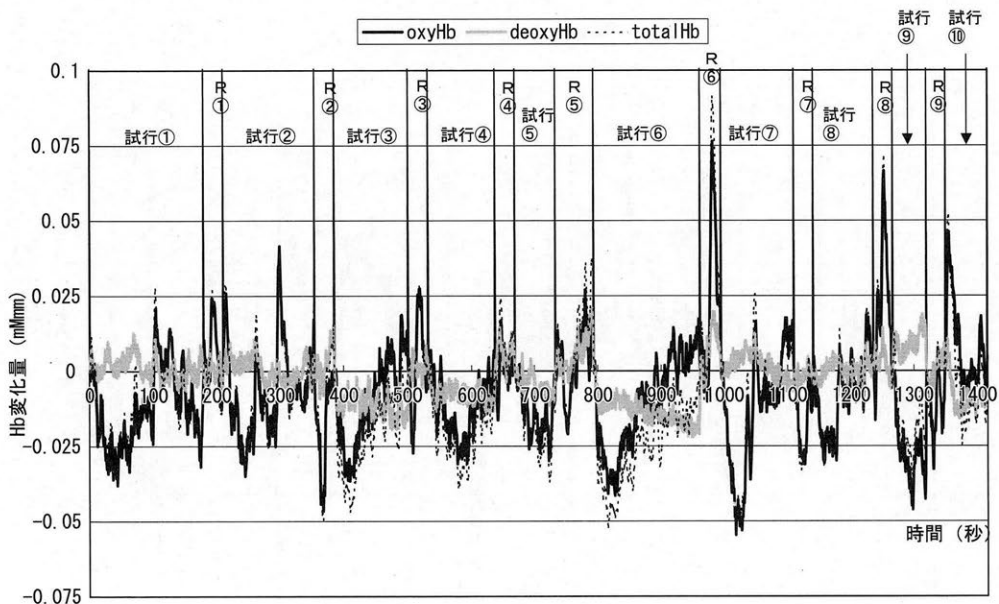


図7 Subject Bのデータ

と考えた。

- (3-13) R⑧「簡単にできる方法がわかった」
と思った。

3.3.5. Subject C の場合 (21歳、女性)

図8はSubject Cのデータであり、レスト時の血液量の増加が確認されなかった事例である。

特徴としては次の点が挙げられる。

- (4-1) R①～R④において、oxyHbとdeoxyHbが減少している。また、R⑥～R⑨においても同様に減少している。
- (4-1) 二種類の課題間のレストであるR⑤において、oxyHb、totalHbの減少と、deoxyHbの増加が見られる。
- (4-3) 試行③～試行④では試行の開始時点で、また試行⑥、試行⑦、試行⑩では、試行の終了時点でoxyHbとtotalHb増加のピークが存在する。

被験者の事後の感想では次の記述がみられた。

- (4-4) 試行全般：動いてはいけないというス

トレスと、集中し続けるストレスがありました。

- (4-5) 試行全般：自分の予想よりは、簡単に早くできたと思う。ピースを使うより使わない方がやりやすかった。

4. 考 察

上記の結果より、負荷の高い課題においてレスト時の血液動態の変化には、被験者の心的変化と課題方略の獲得の有無が大きく影響を及ぼしていることが推測される。

例えば、Subject Aでは、R①、R②、R⑥でのoxyHbとtotalHbの急激な増加が、またR⑤でのoxyHbとtotalHbの減少が見られる。被験者の事後の感想には試行開始時に非常に緊張したと記されているが、それと連動する形でR①、R②において急激なoxyHbとtotalHbの増加が生じている。緊張や焦りといった心的変化が、レスト時のoxyHbとtotalHbの増加につな

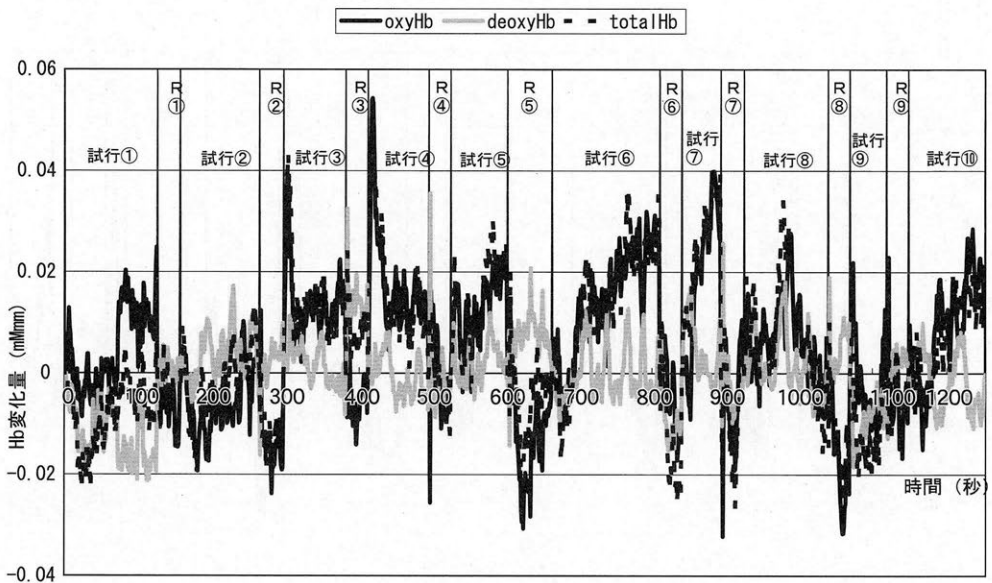


図8 Subject Cのデータ

がったことがうかがえる（2-1、2-7、2-8より）。また、試行①、試行②での所要時間が他の二名と比較しても大きいことから、課題遂行時の負荷が高かったことが推測される。一方、第3試行付近で課題方略方法を獲得したと記しており、同時点のR③、R④ではoxyHbの増加は確認されていない（2-2、2-9より）。方略方法の獲得が落ち着きや安定につながり、レスト時の血液量の増加を抑制するようになったと予想される。また、シート不使用（第⑥～⑩試行）では、スタート時点にシート不使用による不安を述べており、R⑥においてもoxyHbとtotalHbの急激な増加が見られた（2-4、2-10より）。しかし、第7試行以降、すぐさま課題方略方法を獲得したと記述しており、連動する形で血液量の増加が抑制されている（2-5、2-11、2-12より）。

Subject Bでは、シート使用時のR①、R③において、oxyHbとtotalHbの微増が見られる。被験者の事後の感想では、R①の時点で不安を覚えているものの、R②の時点になるとかなり落ち着いて方略を考えることができている、それと連動する形で血液動態も減少している（3-1、3-7、3-8より）。一方、シート不使用時では、R⑥とR⑧において急激なoxyHbとtotalHbの増加が見られる。事後の感想にも、R⑤時点で課題への不安を記しており、さらにR⑥では「何も考えていなかったと思う。」とあるように、過度の集中がレスト時の軽い放心状態につながり、急激な血液量の増加につながったのではないかと予想される。また、Subject Aではシート使用時の所要時間がシート不使用時の2倍以上であったが、Subject Bではシート不使用時の所要時間の割合が大きいことから、シート不使用時の方に大きな負荷がかかり、レスト時の血液の増加につながったのではないかと考えられる（3-4、3-5、3-9、3-10、3-11、3-12、3-13より）。

Subject Cでは、R①～R⑩において目立った増加は確認されず、ほとんどが減少傾向にある。一方、試行段階では、oxyHbとtotalHbの増加が、試行③～試行⑤、試行⑥～試行⑧、試行⑩で確認されており、これまでの他の実験に多く見られる結果と同様の傾向を示している。また、事後の感想において、ストレスを感じつつも、「自分の予想よりは、簡単に早くできたと思う。」と記していることから、課題の負荷が高くないと感じていたことがわかる（4-4、4-5より）。

5. 結 語

一般に、脳内の血液動態の変化は、課題遂行時に血液量が増加し、レスト時に減少すると考えられているが、負荷の高い課題を用いた場合、必ずしもレスト時に減少する結果とはならず、むしろ急激な増加を示す場合も存在することが明らかになった。また、課題方略獲得の有無がレスト時の血液動態に影響する事例を確認することができた。これらの詳細な要因分析については、被験者数の増加と複数の課題による検証を待たなくてはならないが、現段階ではレスト時の血液動態の変化の要因について、次のような仮説を立てている。

- ・負荷の高い課題の場合、試行時間内は課題に集中しているため、その間oxyHbとtotalHbが増加せず、レスト時にそれを補う形で増加する。
- ・レスト時に、無意識に次の課題に対する焦りや、緊張、モチベーションが高まるため、oxyHbとtotalHbが増加する。

上記の結果は、脳内の血液量のデータ測定実験の際、レストが必ずしも脳内の血液量を減少させる時間として作用するのではなく、むしろ活性化の傾向が生じる可能性を示したものである。従って、学習に関連する血液動態の測定実

験においては、ベースライン補正方法やデータ解釈の際に、各課題に対するレストの固有の役割を視野に入れた検討が必要となる。

【参考文献】

- 荒川裕文、中山 実、清水康敬（1999）数字・アルファベットの系列記憶課題における脳波と瞳孔面積に関する検討。電子情報通信学会誌論文誌J82-D- I、1217-1221
- 浅野樹美、中山実、清水康敬（1995）ニューラルネットワークを用いた瞳孔応答モデルと動画番組視聴時の適用。日本教育工学雑誌18（2）、61-70
- 江田英雄（2001）光計測で脳活動をみる。数理学461、サイエンス社、77-83
- 小孫康平、田多興典（1999）連立方程式の解答に伴う瞬目と心拍の変化。日本教育工学雑誌23（1）、45-57
- 向後千春、岸 学（1996）字幕映画の視聴における眼球運動の分析。日本教育工学雑誌20（3）、161-166
- 黒田恭史（2003a）近赤外分光法（NIRS）を用いた図形学習時の脳活動についての研究 — 図形の念頭操作と実物操作時の脳活動の変化 —。佛教大学教育学部学会紀要、2：163-175
- 黒田恭史（2003b）問題解決過程における学習者の特徴について — 平面図形における運動を中心として —。数学教育学会春季年会発表論文集：13-15
- KURODA Yasufumi（2003c）Changing in Amount of Blood of Brain in Problem Solving Process. Human Brain Mapping（New York）、185
- 黒田恭史、江田英雄、菅井勝雄、前迫孝憲（2003d）「脳内の血液量の変化を指標とした評価の可能性について」日本教育工学会研究報告集J E T 03-5、1-8
- 黒田恭史（2003e）合同図形弁別時におけるシート活用の有無がもたらす課題解決方略の差異について。数学教育学会秋季例会発表論文集、153-155
- 村井護晏（1989）皮膚電気活動からみた理科授業分析 — VTR視聴による注意の集中現象について。日本教科教育学会誌第13巻 3・4号、93-99
- 村田 勉（2002）視覚的意識のゆらぎと脳内確率機構。数理学464、サイエンス社、75-83
- Sakatani K, et al.（1998）Language-activated cerebral blood oxygenation and hemodynamic changes of the left prefrontal cortex in poststroke aphasic patients : a near-infrared spectroscopy study. Stroke, 29 : 1299-1304
- Sakatani K, et al.（1999）Cerebral blood oxygenation changes induced by auditory stimulation in newborn infants measured by near infrared spectroscopy. Early Hum Dev, 55 : 229-236
- 丹治順、吉澤修治編（2001）脳の高次機能。朝倉書店、東京
- 山口有美、山口晴久（2001）脳波の周波数解析による学習課題解決プロセスの比較。岡山大学教育実践総合センター紀要、1：59-67
- 山口有美、山口晴久（2002）脳波を用いた幾何学的課題解決過程における学習者の生体情報工学的研究。岡山大学教育実践総合センター紀要、2：71-79
- 付記1：本研究は、平成15年度佛教大学特別研究費、及び平成15～16年度文部科学省科学研究費補助金「基盤研究（C）（2）」（課題番号：15500600）の支援を受けている。
- 付記2：本研究を行うにあたっては、江田英雄氏（独立行政法人 通信総合研究所 関西先端研究センター）、菅井勝雄先生・前迫孝憲先生（大阪大学大学院人間科学研究科）にご指導いただいた。ここに感謝の意を表す。